

В.С. ОСАДЧУК, д-р техн. наук, проф. ВНТУ, Вінниця;
О.В. ОСАДЧУК, д-р техн. наук, проф. ВНТУ, Вінниця;
О.П. БІЛИЛІВСЬКА, аспірант ВНТУ, Вінниця;
О.М. ЖАГЛОВСЬКА, асистент ВНТУ, Вінниця

ОГЛЯД ГАЛЬВАНОМАГНІТНИХ ВИМІРЮВАЧІВ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Розглянуті гальваномагнітні вимірювачі параметрів магнітного поля, виконано їх порівняння з урахуванням таких характеристик, як здатність реєструвати напрямок магнітного поля, чутливість, діапазон вимірювань, температурна стабільність і т.д. Запропоновано провести дослідження двостокових магнітотранзисторів у складі приладів з частотним виходом.

Ключові слова: магнітне поле, гальваномагнітний ефект, магніторезистор, магнітодіод, магнітотранзистор, двостоковий магнітотранзистор.

Вступ. На сьогодні магнітні сенсори набули поширення у багатьох галузях промисловості, адже їх використання для контролю частоти та напрямку обертання, реєстрації лінійних і кутових переміщень, вимірювання струму, гальванічної розв'язки, безконтактного перемикачання, побудови аналітичних приладів, виконання завдань дефектології та геологорозвідки, розпізнавання образів феромагнітних об'єктів, моніторингу позиції поршня в пневматичних та гідравлічних циліндрах тощо забезпечує дотримання більшості сучасних вимог до чутливості, роздільної здатності та інших важливих параметрів вимірювальних систем.

На ринку магнітної сенсорної техніки представлені вимірювачі параметрів магнітного поля різних типів та конструкцій, проте значну роль у цій галузі відіграють напівпровідникові сенсори, оскільки вони при достатній для промислових застосувань точності мають невеликі габарити, низьку ціну, споживають малу потужність та прості в експлуатації. Найбільш поширеними є сенсори Холла та магніторезистори, однак вітчизняні та закордонні наукові установи проводять інтенсивні дослідження інших типів напівпровідникових пристроїв: магнітодіодів, біполярних та польових магнітотранзисторів, магнітотиристорів, а також складних інтегральних магніточутливих структур [1-7]. Така увага до нових конструкцій сенсорів пов'язана із необхідністю підвищення точності безконтактних вимірювань, покращення температурних характеристик перетворювачів магнітного поля тощо.

Метою статті є порівняльний огляд гальваномагнітних вимірювачів магнітного поля та вибір первинного перетворювача для подальших досліджень його параметрів і характеристик у складі приладу контролю параметрів магнітного поля.

Огляд гальваномагнітних приладів. Гальваномагнітні перетворювачі базуються на фізичних ефектах, що виникають у поміщених в магнітне поле твердих тілах при русі в них заряджених частинок: ефект Холла (виникнення поперечної різниці потенціалів на бічних гранях пластини при проходженні електричного струму в поперечному до нього магнітному полі) та ефект Гауса (зміна електричного опору напівпровідника під дією магнітного поля).

Магнітрезистори умовно поділяють на монолітні і плівкові. Монолітний магнітрезистор являє собою підкладку з розміщеним на ній магніточутливим елементом, опір якого збільшується при дії магнітного поля за рахунок ефекту Гауса. Такі магніточутливі елементи виготовляються з напівпровідникових матеріалів із високою рухливістю носіїв заряду: антимоніду індію (*InSb*) та його сполук, арсеніду індію (*InAs*) та ін [3]. Принциповий вигляд монолітного магнітрезистора показаний на рис. 1, *а, б*. При такій конструктивній формі шляхом зміни геометричних параметрів та матеріалу меандра можна змінювати початковий опір магнітрезистора в широких межах [4].

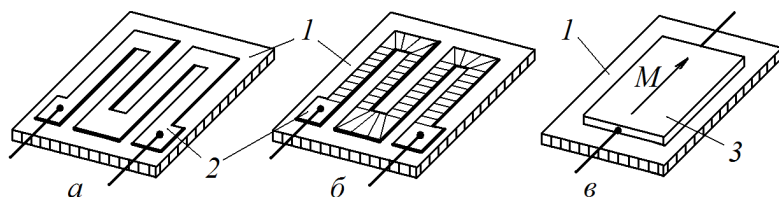


Рис. 1 – Конструкція магнітрезисторів: *а* – монолітний із напівпровідниковою пластиною у формі меандру, *б* – монолітний з поперечними провідними смугами на пластині, *в* – плівковий

На рис. 1 позначено: *1* – підкладка, *2* – напівпровідниковий магніточутливий елемент, *3* – феромагнітна плівка, *M* – головний напрям вектора намагніченості. Магніточутливий елемент плівкових приладів (рис. 1, *в*) виготовлений з феромагнітних плівок, що використовують анізотропний магнітрезистивний ефект (АМР). Максимальне значення магнітоопору тонкоплівкових магнітрезисторів відповідає нульовому зовнішньому магнітного поля, тобто при впливі магнітного поля опір такого магніточутливого елемента зменшується [3]. На сьогодні такі сенсори пропонують провідні виробники сенсорної техніки: Philips, Honeywell, HL-Planartechник і т.д. Для лінеаризації функції перетворення плівкових магнітрезисторів широко використовують чутливі елементи, які складаються із магнітрезистивних плівок пермалою, осаджених на кремнієву пластину у вигляді смужок [8,9].

Магнітрезистори знаходять широке застосування в якості чутливих елементів магнітних датчиків електричного струму і напруги, швидкості і

напрямку обертання, кута повороту і положення, лінійного переміщення і т.д., проте при малих магнітних полях функція перетворення таких датчиків є нелінійною [3].

Елемент Холла (ЕХ) являє собою пластину з напівпровідникового матеріалу, з чотирьох сторін якої розташовані контакти. Конструктивно перетворювачі Холла можуть бути виконані як у вигляді дискретних елементів, так і у вигляді напівпровідникових структур, розташованих в кристалі напівпровідникового матеріалу, в тому числі і разом з електронною схемою підсилення і обробки сигналу ЕХ [3].

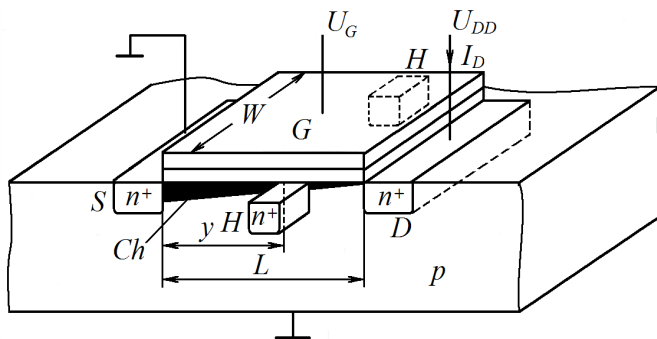


Рис. 2 – Принципова структура польового МОН-елемента Холла [5]

Польовий МОН-елемент Холла (див. рис. 2) відрізняється від звичайного тим, що у звичайному ЕХ носії заряду забезпечуються самим матеріалом, а у МОН-приладі вони генеруються завдяки поверхневому ефекту поля. Напрягу Холла в польовому елементі значно залежить від місця розташування холлівських контактів. Це пояснюється тим, що поле Холла при зменшенні концентрації носіїв заряду збільшується. На практиці оптимальне положення холлівських контактів визначається з умови $0,7 \leq y/L \leq 0,8$. Розрахована абсолютна чутливість такого ЕХ складає $280 \text{ В}/(\text{А} \cdot \text{Т})$ [5]. Значним недоліком польового ЕХ є вплив поверхневої рекомбінації на напругу Холла.

Перетворювачі на основі ефекту Холла використовуються для вимірювання параметрів постійних, змінних та імпульсних магнітних полів, а також для визначення характеристик феромагнітних матеріалів. Суттєвим недоліком таких датчиків є значна температурна залежність ЕРС Холла, висока залишкова напруга.

Магнітодіод (МД) – напівпровідниковий прилад з $p - n$ переходом і непрямою контактами, між якими знаходиться область високоомного напівпровідника.

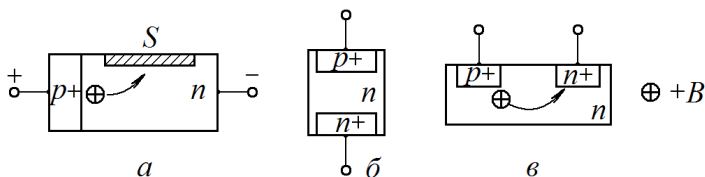


Рис. 3 – Принципова структура магнітодіодів: *a* – з областю високої швидкості рекомбінації, *б* – торцева структура, *в* – планарна структура

Відмінність від звичайних напівпровідникових діодів полягає в тому, що МД (рис. 3, *a*, *б*, *в*) виготовляється з високоомного напівпровідникового матеріалу, провідність якого близька до власної, ширина бази d у кілька разів більша за дифузійну довжину пробігу носіїв L [1]. Перевагою МД є висока питома магнітна чутливість при низьких напругах джерела живлення. Таким чином, ефект магнітоопору за рахунок зміни рівня інжекції підсилюється в сотні разів.

Магнітотранзистор (МТ) – це транзистор, структура та параметри якого оптимізовані для отримання магнітної чутливості їх колекторних струмів. Дія магнітного поля на звичайні біполярні транзистори виявляється у викривленні траєкторії інжекттованих із емітера носіїв заряду, що приводить до збільшення ефективної довжини бази та відхилення частини носіїв від колектора [2]. Роль останнього ефекту збільшується зі зменшенням ширини емітера та колектора, що забезпечує збільшення магніточутливості. Тому латеральна конструкція виявляє найбільшу магніточутливість. На рис. 4 зображена структура такого магнітотранзистора; пунктиром показана область об'ємного заряду колекторного $p-n$ переходу.

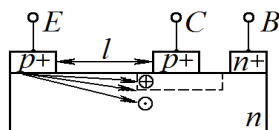


Рис. 4 – Структура біполярного одноколекторного магнітотранзистора

На рис. 4 лінії із стрілками указують напрям руху носіїв заряду: верхня – в магнітному полі $\oplus B$, нижня – в полі $\ominus B$, середня лінія – при $B = 0$.

Двоколекторні магнітотранзистори (ДКМТ) характеризуються лінійною залежністю вихідного сигналу від напруженості магнітного поля в широкому діапазоні значень магнітної індукції, чутливістю до напрямку магнітного поля і високою реальною чутливістю, оскільки ДКМТ є балансними приладами [1–3]. При тих самих робочих струмах чутливість двоколекторних магнітотранзисторів на два-три порядки вища, ніж чутливість сенсорів

Холла. Висока чутливість і лінійність характеристики при малих магнітних полях дозволяють використовувати магнітотранзистори як сенсори слабких магнітних полів (відтворюючі магнітні голівки, електронні компаси і т.д.). У великих магнітних полях чутливість зменшується за рахунок того, що всі носії вже перерозподілені, і напруга. Біполярні магнітотранзистори мають великі значення керуючих струмів, високий рівень шумів.

Магніточутливі польові транзистори (МПТ). Принципова структура двостокового магніточутливого польового транзистора зображена на рис. 5 [5]. Транзистор має два стоки, D_1 та D_2 , які розташовані один біля одного та розділені ізолятором, тому струм витоку S розділяється між обома стоками рівномірно. При дії зовнішнього магнітного поля перпендикулярно до поверхні транзистора носії заряду під дією сили Лоренца відхиляються в бік одного зі стоків (залежно від напрямку складової індукції B_z), внаслідок чого струм одного стоку збільшується, а іншого – зменшується.

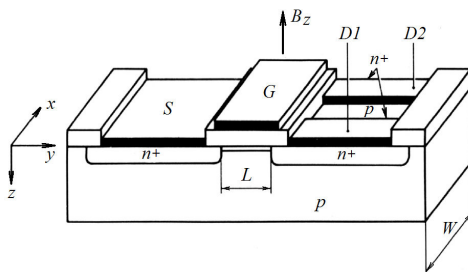


Рис. 5 – Принципова структура двостокового магнітотранзистора [5]

Відносна чутливість багатостокових магнітних сенсорів при малих значеннях магнітної індукції визначається як похідна відносного розбалансу струмів по магнітній індукції, узята при нульовій індукції. Через низьку холлівську рухливість носіїв в області каналу чутливість S_R виявляється низькою (2...3 %/Тл). Проте можна одержати високі значення абсолютної чутливості, якщо транзистор працює в режимі насичення з підключеними до стокових елементів високоомними резисторами навантаження. У такому випадку корисний сигнал є різницею напруг між двома стоками. До недоліків польових магнітотранзисторів відносять температурну залежність опору каналу, однак такі вимірювачі характеризуються також низьким рівнем шумів, низькими керуючими струмами, високою швидкодією.

Ще одним класом гальваноманетних приладів є магнітотиристри. Будь-який тиристор можна розглядати як з'єднання транзистора з транзистором, причому колектор кожного із них з'єднаний із базою другого. На відміну від інших існуючих магнітних датчиків, магніточутливі тиристри

можуть бути використані і як магнітокеровані перемикачі, і як вимірювачі магнітного поля, забезпечуючи при цьому струми від десятків міліампер до сотень ампер [1]. Магніточутливі симістори можуть виконувати ту ж роль, при чому в обох напрямках провідності. Через невисоку абсолютну чутливість дискретні магнітотристори не знайшли широкого застосування і їх використовують переважно в інтегральних магнітних датчиках [3].

Гальваномангніторекомбінаційні (ГМР) перетворювачі базуються на зміні середньої концентрації носіїв заряду під дією магнітного поля, що проявляється в провідниках, які мають поверхні з різною швидкістю рекомбінації носіїв зарядів.

На рис. 6 перетворювач являє собою тонку напівпровідникову пластину, у якій поверхня 1 погано оброблена, а поверхня 2 відполірована. Внаслідок цього біля поверхні 1 швидкість рекомбінації носіїв зарядів на 2-3 порядки більша, ніж біля поверхні 2. Якщо перетворювач знаходиться в магнітному полі так, що вектор магнітної індукції направлений перпендикулярно вектору густини струму і паралельно площинам, то під дією сила Лоренца відбувається відхилення носіїв заряду до однієї з бічних поверхонь, змінюється опір ГМР перетворювача. Основними недоліками цього типу приладів є вплив температури, шумів та контактів, складність виготовлення. ГМР перетворювачі використовуються для вимірювання індукції постійних та змінних магнітних полів, безконтактного вимірювання струму, малих переміщень тощо [11].

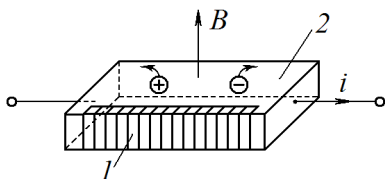


Рис. 6 – Гальваномангніторекомбінаційний перетворювач

У таблиці зведені найважливіші параметри розглянутих гальваномангнітних приладів на основі джерел [1–5, 8–11].

Серед розглянутих вимірювачів магнітного поля для подальших досліджень обрано польові магнітотранзистори, які технологічно та електрично сумісні із МДН-транзисторами, завдяки чому такі елементи можна виготовляти на одному кристалі зі схемами обробки. Окрім того, багатостокові МОН-магнітотранзистори мають значно вищу чутливість, ніж інші гальваномангнітні перетворювачі, на їх основі можна побудувати вимірювачі трьох просторових складових магнітної індукції.

Таблиця – Порівняння гальваномагнітних перетворювачів

Тип приладу	Нелінійність, %	Споживаний струм, мА	Діапазон робочих частот, Гц	Чутливість, В/Тл	Діапазон вимірювань, Тл
Магніто-резистори:	1	2,5	$0-10^2$	біля 0,1 (монолітні), 5-32 (плівкові)	$10^{-2}-1$ (монол.), $10^{-10}-3 \cdot 10^{-2}$ (плівкові)
Елементи Холла	1	0,5	$0-10^6$	0,0056-6,4	$10^{-4}-2 \cdot 10^{-2}$
Магнітодіоди	0,5	1	$0-10^8$	до 30	$10^{-6}-1$
Біполярні магніто-транзистори	0,3	4-10	$0-10^9$	біля 40 (1колектор), до 500 (ДКМТ)	$10^{-6}-0,5$
Польові магніто-транзистори	0,3	$5 \cdot 10^{-7}-0,3$	$0-10^9$	до 400	$10^{-6}-0,5$
Магніто-тиристори та магніто-симістори	0,3	10	$0-10^5$	10-100	$10^{-5}-10$
ГМР перетворювачі	0,4	10	$0-10^4$	16-80	$5 \cdot 10^{-7}-1$

Подальшим напрямком досліджень є використання двостокового МОН-магнітотранзистора у складі структури з від'ємним опором для побудови частотного приладу контролю магнітної індукції. Використання частоти як інформативного параметру дозволяє уникнути застосування підсилювальних пристроїв і аналого-цифрових перетворювачів при обробці інформації [6]. У напівпровідникових структурах з від'ємним опором, що призначені для вимірювання магнітного поля, напівпровідниковий прилад виступає і в якості магніточутливого елемента, і в якості елемента, який утворює генератор електричних коливань [6, 7, 12].

Висновки. На основі огляду літератури проведено порівняльний аналіз гальваномагнітних вимірювачів параметрів магнітного поля (в першу чергу, магнітної індукції) із врахуванням їх найважливіших метрологічних параметрів. Для подальших досліджень обрано МОН-магнітотранзистори, які мають низький рівень шумів, низькі керуючі струми, високу швидкодію, при чому чутливість двостокових польових транзисторів наближається до чутливості біполярних двоколекторних транзисторів. Також чутливість та точність вимірювання магнітної індукції можна підвищити шляхом побудови автогенераторного пристрою з використанням чутливого елемента.

Список літератури: 1. Викулин И.М. Гальваномагнитные приборы / И.М. Викулин, В.И. Стафеев. – М. : Радио и связь, 1983. – 104 с. 2. Викулин И.М. Магниточувствительные транзисторы / И.М. Викулин, Л.Ф. Викулина, В.И. Стафеев // Физика и техника полупроводников. – 2001. – №1. – С. 3–10. 3. Бараночников М.Л. Микромагнитозлектроника. – М. : ДМК Пресс, 2001. – Т.1. – 364 с. 4. Котенко Г.И. Магниторезисторы. – Л. : Энергия, 1972. – 80 с. 5. Popovic R.S. Hall effect devices. – Bristol ; Philadelphia : Institute of Physics, 2004. – 419 p. 6. Осадчук В.С. Напівпровідникові перетворювачі інформації: Навч. посібн. / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. – Вінниця: ВНТУ, 2004. – 208 с. 7. Осадчук В.С. Сенсори тиску і магнітного поля: Моногр. / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 207 с. 8. Three-Axis Magnetic Sensor HMC1043. Проспект фірми «Honeywell». 2013. – 6 р. 9. Борисов А. Современные АМР-датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей // Компоненты и технологии. – 2006. – №7. – С. 56–60. 10. Heremans J. Solid state magnetic field sensors and applications // Journal of Physics D : Applied Physics. – 1993. – Vol. 26. – No 8. – P. 1149-1168. 11. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин : (Измерительные преобразователи). Учеб. Пособие для вузов. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с. 12. Пат. 70192 Україна, МПК H01L29/82, H01L43/00, G01R33/06. Мікроелектронний вимірювач магнітної індукції / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, О.П. Білилівська; Заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – №u201115372; Заявл. 26.12.2011; Опубл. 25.05.2013, Бюл. №10. – 3 с.

Надійшла до редколегії 18.10.2012

УДК 681.586.72

Огляд гальваномагнітних вимірювачів параметрів магнітного поля / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, О.П. Білилівська, О.М. Жагловська // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 8 (982). – С. 76–83. – Бібліогр.: 12 назв.

Рассмотрены гальваномагнитные измерители параметров магнитного поля, выполнено их сравнение с учетом таких характеристик, как способность регистрировать направление магнитного поля, чувствительность, диапазон измерений, температурная стабильность и т.д. Предложено провести исследования двухстоковых магнитотранзисторов в составе приборов с частотным выходным сигналом.

Ключевые слова: магнитное поле, гальваномагнитный эффект, магниторезистор, магнитодиод, магнитотранзистор, двухстоковый магнитотранзистор.

Galvanomagnetic devices for measuring of the magnetic field parameters are considered and compared. Their characteristics such as the ability to sense the direction of the magnetic field, sensitivity, measurement range, thermal stability, etc are taken into account. It is purposed to research the split-drain magnetotransistor as a component of the devices with a frequency output.

Keywords: magnetic field, galvanomagnetic effect, magnetoresistor, magnetodiode, magnetotransistor, split-drain magnetic field-effect transistors.